

基于改进三维足迹模型的关中地区 土地自然资本利用状况分析

吴健生^{1,2}, 李铠杨^{1,3}, 赵宇豪^{1,2}

(1. 北京大学城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 三维生态足迹是可持续发展量化评价的重要方法, 陕西关中地区作为丝绸之路经济带的重要承载地, 研究其土地自然资本利用状况对可持续发展具有重要意义。论文采用改进三维足迹模型, 并利用足迹广度基尼系数等指标, 对关中地区 1995—2015 年自然资本利用状况从“产品—地类—区域”3 个尺度进行了分析。结果表明: ① 1995—2015 年, 关中地区土地足迹呈现先增后减的变化趋势, 土地承载力逐年下降, 生态赤字逐年增大, 不利于可持续发展; ② 关中地区 5 个市均处于生态赤字状态, 足迹深度均超过原长 1, 消耗存量资本来弥补流量资本的不足已成关中地区社会发展的常态; ③ 耕地和建设用地位于流量资本占用主要地类, 草地、耕地和建设用地位于存量资本消耗主要地类; ④ 区域内部流量占用不公平程度逐渐增加, 若仍不采取合理措施, 2025 年将呈现较不均衡状态, 2030 年则为高度不均衡。论文聚焦“实态足迹”, 揭示了关中地区土地利用效益, 为其可持续发展提供科学参考。

关键词: 三维生态足迹; 关中地区; 自然资本; 可持续发展

牢固“绿水青山就是金山银山”的发展理念, 加强生态文明建设已成为十九大以来中国发展的重要战略任务, 其任务难点在于如何协调好经济社会发展与生态环境保护两者的关系, 而这也是可持续发展问题的研究重点。可持续发展的本质包括经济系统的可持续和生态系统的可持续, 在可持续性发展研究中, 需要通过某一媒介将 2 个系统串联, 进而对两者协调关系进行分析, 这一媒介便是自然资本^[1]。与自然资本相对的是人造资本, 随着社会的发展, 越来越多的学者认为相对于人造资本, 自然资本已成为提高人类福利的首要限制因素^[2]。自然资本按来源及利用特性分为流量资本和存量资本^[3], 流量资本为生态系统所提供的年际可再生的产品或服务, 存量资本为生态系统提供的不可再生的产品或服务, 其作为流量资本的补充, 应对流量资本被完全占用的情况。为量化分析自然资本利用

状况, 国内外学者提出多种自然资本核算方法, 生态足迹作为一种从生态视角核算自然资本的方法, 以其模型清晰、计算科学而被广泛应用于可持续发展研究中。生态足迹经历了由 Rees^[4]提出的一维模型^[5]到 Wackernagel 等^[6]完善的二维模型^[7]的发展, 不难发现, 传统生态足迹模型只是对流量资本进行分析, 而可持续发展关键在于存量资本消耗与否。因此, Niccolucci 等^[8]提出存量资本的概念, 并引入足迹深度和足迹广度 2 个指标分别度量存量资本消耗和流量资本占用程度, 将生态足迹由二维平面模型扩展为三维立体模型。

目前, 国外对于三维生态足迹的研究多以理论研究为主, 方恺等将三维生态足迹模型引入国内, 并从全球^[9-10]、全国^[11]、省际^[12]等尺度进行了研究, 杜悦悦等^[13]、张星星等^[14]从城市群的尺度分别对京津冀和珠三角城市群自然资本利用状况进行了分析,

收稿日期: 2019-06-26; 修订日期: 2019-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671180)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671180.]

第一作者简介: 吴健生(1965—), 男, 教授, 研究方向为遥感与 GIS、土地利用规划等。E-mail: wujks@pkusz.edu.cn

引用格式: 吴健生, 李铠杨, 赵宇豪. 基于改进三维足迹模型的关中地区土地自然资本利用状况分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(8): 1345-1355. [Wu Jiansheng, Li Kaiyang, Zhao Yuhao. The use of land natural capital in the Guanzhong region based on a revised three-dimensional ecological footprint model. Progress in Geography, 2020, 39(8): 1345-1355.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.08.009

马维兢等^[15]则从流域尺度出发对九龙江流域三维生态足迹进行了研究,郑德凤等^[16]基于消费视角从省际层面对中国30个省的存量资本以及流量资本进行了评估分析。以上研究选取的生态足迹核算均包括生物资源消费以及能源消费2大账户,其中生物资源消费账户通过各类生物产品的消费量核算其足迹,各类生物生产性土地核算其对应的承载力,而在能源消费账户核算中,因无专门吸收化石能源燃烧排放废气的生态生产性土地^[17],多数研究选择林地作为其对应的承载力,这难免带来一些问题:林地虽作为主要吸附CO₂用地,但草地、水域等其他用地也具有不同程度的固碳能力,仅以林地作为能源碳排放对应的土地承载力,常会导致过于悲观估计能源足迹深度。最重要的是,生物资源消费核算的生态足迹为实际消耗量所切实需要的生产性土地面积,而能源消费核算的生态足迹则表示为了吸收化石能源燃烧所产生的废气理论上需要的土地面积^[17],两者逻辑明显不一致,前者对应“实态足迹”,而后者则表示“虚态足迹”^[18],直接将两者相加并不利于反映区域自然资本利用实际状况。因此,本文基于改进三维足迹模型,从“实态足迹”出发,对陕西省关中地区1995—2015年自然资本利用状况进行分析,以期对关中地区在“一带一路”建设发展契机下寻求可持续发展道路提供科学建议。

1 研究方法

本文采用方恺等^[19]提出的基于生产性视角定义的土地足迹和土地承载力核算方法及适用于“产品—地类—区域”三重尺度转换的足迹广度和足迹深度计算方法,分别从产品、地类、区域3个不同尺度进行土地足迹、土地承载力、足迹深度、足迹广度核算,对陕西省关中地区西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南等5个市(本文将杨凌示范区并入咸阳市一同考虑)1995—2015年的自然资本利用进行分析,并借助一系列土地足迹衍生指标从不同侧面揭示存量资本消耗和流量资本占用情况。

1.1 改进的三维足迹模型

1.1.1 土地足迹和土地承载力核算

方恺等^[19]提出的改进三维足迹模型扣除了化石能源消费账户,将生物资源消费与建设用地消费2大核算账户的“实态”足迹定义为土地足迹,其对应的生物承载力称为土地承载力。因此土地足迹

即表征为支撑一个区域一年的生物产品生产和建设用地扩张所需要的生产性土地面积,对应的土地承载力即表征为一个区域一年实际可以提供的生产性土地面积。具体计算公式如下^[19]:

$$LF = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{ij}}{AP_{w,ij}} \times r_j \right) \quad (1)$$

$$LC = 0.88 \times \sum_{j=1}^n (A_j \times r_j \times y_j) \quad (2)$$

式中:LF表示土地足迹; n 和 m 表示土地利用类型数和产品类型数(本文中 $n=5$); P_{ij} 表示 j 类土地 i 类产品产量; $AP_{w,ij}$ 表示 j 类土地的 i 类产品的全球平均产量; r_j 表示对应 j 类土地的均衡因子;LC表示土地承载力,且根据世界环境与发展委员会(World Commission on Environment and Development, WCED)建议扣除12%的生物多样性保护面积; A_j 表示 j 类土地面积; y_j 表示 j 类土地的产量因子。

1.1.2 足迹深度和足迹广度核算

Niccolucci等^[20]对足迹深度和足迹广度的核算只能用于某一种地类进行单一尺度核算,如果将其应用于多种地类或转换到区域层面进行计算时,简单的加和往往会出现低估足迹深度而高估足迹广度的问题。鉴于此,方恺等^[21]提出改进算法,从而实现从地类到区域不同研究尺度的转换。并且基于此种转换原则,将其应用到土地足迹深度与足迹广度核算方法中,具体计算方法如下^[19]:

$$LF_{dep,j} = 1 + \frac{\max\{LF_j - LC_j, 0\}}{LC_j} \quad (3)$$

$$LF_{dep,reg} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^n \max\{LF_j - LC_j, 0\}}{\sum_{j=1}^n LC_j} \quad (4)$$

$$LF_{siz,j} = \min\{LF_j, LC_j\} \quad (5)$$

$$LF_{siz,reg} = \sum_{j=1}^n \min\{LF_j, LC_j\} \quad (6)$$

式中: $LF_{dep,j}$ 表示 j 类土地足迹深度; $LF_{dep,reg}$ 表示由各地类所组成的整个区域的足迹深度; $LF_{siz,j}$ 表示 j 类土地足迹广度; $LF_{siz,reg}$ 表示由各地类所组成的整个区域的足迹广度。

1.2 模型补充

1.2.1 存量资本—流量资本利用比

在生态赤字情况下,流量资本已被完全占用,开始消耗存量资本,存量资本与流量资本利用比 UR_{no}^{sto} 计算公式如下^[19]:

$$UR_{no}^{sto} = \frac{LF - LF_{siz}}{LF_{siz}} = LF_{dep} - 1 \quad (LF > LC) \quad (7)$$

1.2.2 流量资本占用率

在生态盈余情况下,未消耗存量资本,仅占用流量资本,流量资本占用率 UE_{no} 计算公式如下^[19]:

$$UE_{no} = \frac{LF_{siz}}{LC} \times 100\% \quad (LF \leq LC) \quad (8)$$

1.2.3 自然资本流量和存量多样性指数

分析流量资本的占用和存量资本的消耗在不同地类间分布的多样性情况对于改善生态系统结构以及提高生态系统功能具有重要意义。自然资本流量和存量多样性指数计算方法为^[19]:

$$ID_{siz} = - \sum_{j=1}^n (PLF_{siz,j} \times \ln PLF_{siz,j}) \quad (9)$$

$$ID_{dep} = - \sum_{j=1}^n (PLF_{dep,j} \times \ln PLF_{dep,j}) \quad (10)$$

式中: ID_{dep} 与 ID_{siz} 分别表示流量资本和存量资本多样性指数; $PLF_{siz,j}$ 与 $PLF_{dep,j}$ 分别表示 j 类土地的足迹广度或足迹深度在整个区域足迹广度或足迹深度中的比例。

1.2.4 足迹广度基尼系数

足迹广度基尼系数^[21]是指用于进行不平均分配的流量资本在全部流量资本中所占的比例,可以用来表征区域内部流量资本占用的不公平现象,计算公式如下:

$$G_{EF_{siz}} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\lambda_{EF_{siz,i}} \times \sum_{i=1}^n \lambda_{pop,i} \right) - \sum_{i=1}^n \left(\lambda_{EF_{siz,i}} \times \lambda_{pop,i} \right) - 1 \quad (11)$$

式中: $G_{EF_{siz}}$ 表示足迹广度基尼系数($0 \leq G_{EF_{siz}} < 1$), $\lambda_{EF_{siz,i}}$ 表示第 i 个次区域的足迹广度占主区域的足迹广度的比例; $\lambda_{pop,i}$ 表示第 i 个次区域的人口数占主区域总人口数的比例; $\sum_{i=1}^n \lambda_{pop,i}$ 表示1~ i 个次区域的人口数占主区域总人口数的累积比例。

2 研究区及数据来源

2.1 研究区概况

关中地区是西北地区城镇密集、人口稠密、经济最发达的地区,位于 $33^{\circ}34'N \sim 35^{\circ}52'N$ 、 $106^{\circ}18'E \sim 110^{\circ}38'E$ 的渭河盆地,南北宽30~80 km,东西长400 km,总面积约5.56万 km^2 ,辖西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南以及杨凌区共5市1区,占全省总面积的23.38%(图1)。区域内地势西高东低,包含秦岭山地、渭河平原以及渭北黄土高原,属于大陆性季风

气候,年均气温为6~13℃,年降水量500~800 mm,降水集中,雨热同期,四季分明,光照充足,自然环境条件和社会经济发展状况存在较大差异。

2015年关中地区常住人口和人均GDP在陕西省占比高达70%。随着2013年“一带一路”倡议的提出,关中地区作为丝绸之路经济带的重要承载地再次受到国际瞩目,2018年初,国务院批复印发“关中平原城市群发展规划”,规划中明确提出要将其建设成为具有国际影响力的国家级城市群,而关中地区作为关中平原城市群的核心地带,集聚大量优质资源,具有得天独厚的发展优势,其未来必将成为陕西省乃至整个西部地区重要的经济增长极,走向国际舞台。伴随着经济发展态势的逐渐明朗,寻求一种绿色健康可持续发展方式已成为生态文明背景下关中地区唯一发展出路。在“绿水青山就是金山银山”的发展理念指引下,关中地区在渭河水质改善、退耕还林、节能减排等方面取得了较为显著的进展,生态环境有所改观。但由于关中地区生态基础脆弱,传统粗放式发展方式遗留下的环境问题深厚,加之近年来关中地区城镇化与现代化进程明显加速,在追求区域经济高幅增长的同时人地矛盾日渐突出,城市人口膨胀与资源环境只能提供有限承载力之间的问题日益尖锐,生态环境压力逐渐增大,关中地区生态文明建设及可持续发展仍任重道远。

2.2 数据来源

本文采用的数据来源包括陕西省关中地区5个市1996—2016年统计年鉴以及同期土地利用数据库,其中各类生物产品,包括农产品(小麦、玉米、棉花、油料、烤烟、蔬菜、水果等)、林产品(生漆、核桃、板栗、花椒等)、畜牧产品(猪肉、牛肉、羊肉、奶类、禽蛋等)和水产品等4大类数10小项产量数据来自于《西安市统计年鉴》(1996—2016年)、《铜川市统计年鉴》(1996—2016年)、《宝鸡市统计年鉴》(1996—

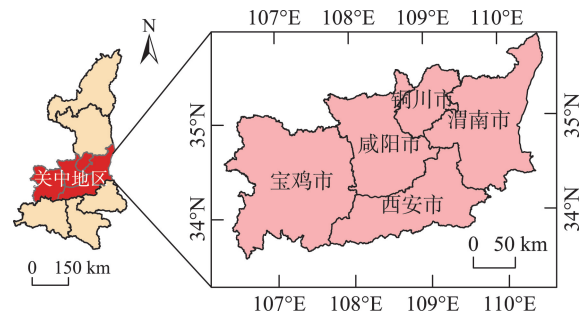


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

2016年)、《咸阳市统计年鉴》(1996—2016年)以及《渭南市统计年鉴》(1996—2016年);土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心提供的1995—2015年中国1:100000土地利用现状遥感监测数据;人口数据来自于《陕西省人口普查资料》;全球平均产量参考杨屹等^[22]的研究结果;均衡因子和产量因子参考刘某承等^[23-24]研究结果。需要说明的是,考虑到数据的统一性和可比性,本文将杨凌示范区并入咸阳市考虑。

3 结果分析

3.1 三维生态足迹

3.1.1 土地足迹时空变化

基于改进的三维土地足迹模型核算关中地区1995—2015年土地足迹,结果见表1,可见,1995—2015年关中地区人均土地足迹整体呈上升趋势,从0.391 hm²/人增长至2010年的0.596 hm²/人,增幅为0.205 hm²/人,2015年微幅降至0.524 hm²/人。进一步分析土地足迹地类构成情况,1995—2015年耕地始终为土地足迹的第一大地类,占比80.42%~85.09%,呈现先增后减的微幅波动变化。其中耕地足迹构成组分情况见图2,在20 a的研究期间,关中

地区农业生产方式由单一粮食主导型向多元谷物蔬果均衡型方向转变,20世纪90年代占据耕地足迹主导地位的小麦占比由57.3%降至36.1%,玉米足迹占比由25.9%增至29.8%。同期蔬菜和水果足迹分别增长了2.9倍和4.3倍,在耕地足迹中占比合计由10.8%增至30.2%,表明关中地区农业生产趋向于多元化。建设用地作为关中地区土地足迹的第二大地类,占比8.30%~12.18%,呈现出先减后增的变化趋势。草地足迹占比逐年增高,从4.81%增至7.89%。对草地足迹构成组分情况进行分析发现(图3),猪肉、牛肉和羊肉足迹在草地足迹中占比由1995年的88.5%降至2015年的69.2%,同期奶制品足迹由9.8%增至29.7%,禽蛋足迹也表现出微幅增长变化趋势,反映出关中地区畜牧产品生产向品质化、精细化方向发展的趋势。水域和林地足迹在土地足迹中的份额较小,其中水域为0.38%~0.77%,林地为0.01%~0.05%。

对关中地区各市土地足迹进行空间可视化分析,结果见图4。1995年关中地区土地足迹由大到小依次为渭南>宝鸡>西安>咸阳>铜川,2005年咸阳市土地足迹显著增大,各市土地足迹为宝鸡>咸阳>渭南>西安>铜川;2015年除西安市土地足迹微幅下降外,其余各市均呈现上升趋势,其中增幅最

表1 关中地区土地足迹及地类构成

Tab.1 Land use ecological footprint and its compositions in the Guanzhong region

年份	人均土地足迹/(hm ² /人)	地类/%				
		耕地	草地	林地	水域	建设用地
1995	0.391	82.62	4.81	0.01	0.38	12.18
2000	0.460	84.45	4.66	0.01	0.46	10.41
2005	0.496	82.72	6.63	0.02	0.46	10.17
2010	0.596	85.09	6.17	0.03	0.41	8.30
2015	0.524	80.42	7.89	0.05	0.77	10.86

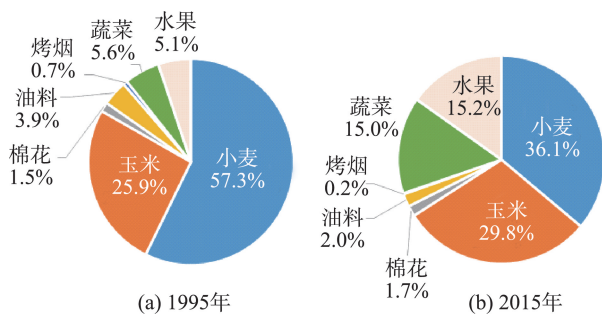


图2 1995和2015年耕地足迹产品构成比较
Fig.2 Compositions of cropland ecological footprint in 1995 and 2015

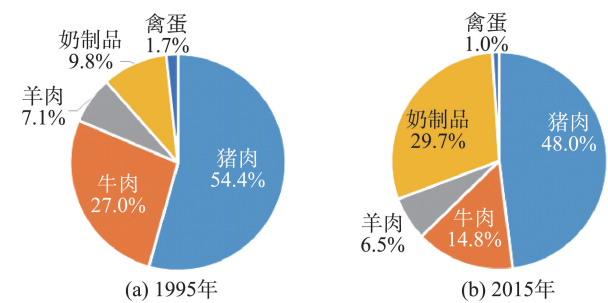


图3 1995和2015年草地足迹产品构成比较
Fig.3 Compositions of grassland ecological footprint in 1995 and 2015

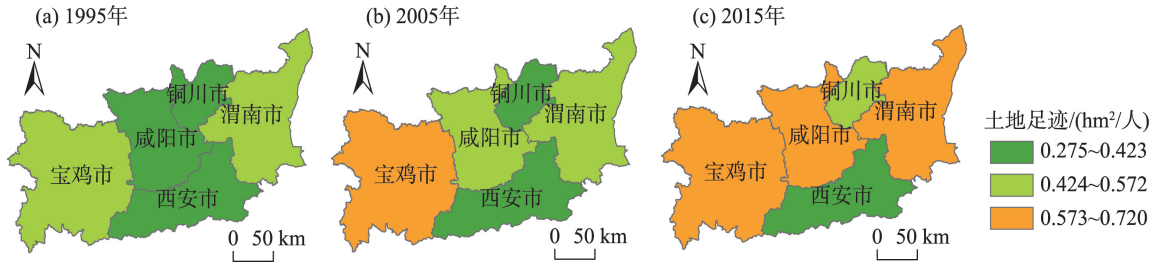


图4 关中地区土地足迹空间格局

Fig.4 Spatial patterns of land use ecological footprint in the Guanzhong region

大为铜川,各市土地足迹为渭南>咸阳>宝鸡>铜川>西安。总体上看,20 a间,渭南市、咸阳市和宝鸡市土地足迹始终处于较高水平,且均呈现上升趋势,其中渭南市基本保持关中地区土地足迹首位,于2015年达到0.670 hm²/人的最高值;咸阳市增幅最大,由1995年的0.316 hm²/人增至2015年的0.620 hm²/人,增幅为0.304 hm²/人。铜川市土地足迹虽处于较低水平,但仍呈现逐年递增变化趋势,由1995年的0.275 hm²/人增至2015年的0.443 hm²/人。相比于关中地区其余4个市,西安市土地足迹在研究期间呈现先增后减的变化趋势,且2015年降至0.347 hm²/人的最低值。对各市土地足迹构成组分分析发现,20 a来各市土地足迹构成组分均稳定表现为耕地>建设用地>草地>水域>林地,且除西安市耕地足迹呈现逐渐下降趋势外,其余各市耕地足迹均呈现先增后减的变化趋势;而建设用地足迹、草地足迹、水域足迹以及林地足迹在5个市中均呈现逐渐增加的变化趋势。

关中地区各市土地足迹产生以上明显分异变化的主要原因在于渭南、咸阳2市所处地势较为平坦,水热条件较为良好,作为重要商品粮农业基地,一直以来为关中地区乃至更大范围发展提供充足生产要素,因此导致其以农作物生产为主的自然资本消耗量大。铜川和宝鸡2市所在地区地形起伏较大,林草地资源丰富,从而导致其以林产品生产为主的自然资本消耗量大。而西安市作为陕西省省会,在研究期间城市化进程明显加快,人口急剧增加,加之部分生产性要素向外转移,使得以生产性视角核算的人均土地足迹逐渐降低。

3.1.2 足迹广度、足迹深度时空变化

关中地区1995—2015年足迹广度呈现出先降低后微幅增加的变化趋势(图5),由1995年的0.124 hm²/人降至2010年的0.111 hm²/人,后微幅增长至2015年的0.113 hm²/人。对关中地区足迹广度构成

组分进行分析,其中耕地足迹广度对区域足迹广度贡献度最高,其占比表现出逐年下降的趋势,由80.24%降至73.21%;作为第二组分的建设用地则表现出逐年上升的变化趋势,由14.48%增至19.14%;除草地足迹表现出微幅下降的趋势外,水域和林地足迹广度均表现出微幅上升的变化趋势。计算关中地区各市1995—2015年足迹广度可知(表2):关中地区5个市足迹广度在1995年依次为咸阳>铜川>渭南>宝鸡>西安;2005与2015年各市足迹广度大小排序相同,为铜川>渭南>咸阳>宝鸡>西安。西安足迹广度在研究期间均处于末位,主要原因在于西安相较关中地区其余4市拥有绝对高密度的人口。从各市足迹广度构成组分变化中,可以很明显看到耕地组分对关中地区5个市足迹广度具有绝对高度贡献度,占比高达58.8%~89.7%(最小值和最大值分别对应西安和咸阳)。1995—2015年耕地足迹广度在5个市均表现出不同程度的下降,尤以西安、咸阳2市耕地足迹广度下降幅度显著,降幅分别为0.016 hm²/人和0.019 hm²/人。建设用地作为各市足迹广度的第二大组分,在各市均表现出微幅上升趋势;草地足迹广度在5个市中表现较为稳定,除1995—2000年间均表现出微幅下降趋势外,2000—2015年间均保持稳定态势;林地足迹广度在

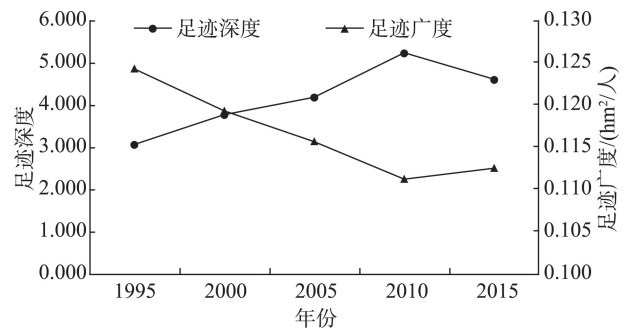


图5 足迹深度和足迹广度变化

Fig.5 Changes of land use ecological footprint depth and size

表2 关中地区各市足迹广度及地类构成

Tab.2 Land use ecological footprint size and its compositions for cities in the Guanzhong region

地区	年份	人均足迹广度/(hm ² /人)	地类/%				
			耕地	草地	林地	水域	建设用地
西安	1995	0.072	67.9	3.7	0	2.3	26.2
	2005	0.064	64.1	3.6	0	2.4	29.8
	2015	0.057	58.8	3.5	0.1	3.6	34.1
铜川	1995	0.152	83.6	2.2	0	0.5	13.6
	2005	0.146	82.2	2.3	0.1	0.9	14.6
	2015	0.153	76.8	2.1	0.4	1.3	19.4
宝鸡	1995	0.144	76.2	9.7	0	0.9	13.1
	2005	0.138	72.9	9.5	0.1	1.8	15.7
	2015	0.139	70.2	9.3	0.2	1.8	18.5
咸阳	1995	0.155	89.7	2.4	0	0.5	7.4
	2005	0.142	87.9	2.4	0	1.4	8.4
	2015	0.140	85.9	2.3	0	1.6	10.1
渭南	1995	0.145	80.9	2.4	0.1	1.5	15.1
	2005	0.142	78.1	2.3	0.2	2.5	16.8
	2015	0.151	72.5	2.2	0.3	6.3	18.6

5个市中均表现出微幅增长趋势,且2010—2015年增幅较之前明显增大,这主要与关中地区积极响应党的十八大提出的生态文明建设倡议有关;水域足迹广度表现较为稳定,西安、渭南两市在2010—2015年水域足迹广度表现出微幅增加的趋势,说明2011年实行的渭河综合整治以及生态文明建设初见成效。

关中地区1995—2015年足迹深度表现出先增后减的波动变化(图5),1995—2010年关中地区足迹深度始终呈增长趋势,由3.05增至5.21,表明关中地区生态压力持续增大。2010年后,关中地区足迹深度表现出微幅下降的趋势,至2015年足迹深度为4.59,降幅为0.62,这也反映出关中地区生态文明建设已初见成效。对关中地区足迹深度构成组分情况进行分析,在20 a研究期内,草地始终作为第一构成组分且表现出逐渐上升的变化趋势,占比由

32.09%增至49.58%;第二构成组分的耕地足迹深度表现出先增后减的波动变化,波动变化区间为26.43%~31.02%;其次为建设用地足迹深度,占比为13.66%~22.78%;林地和水域由于均处于生态盈余状态,足迹深度均为原长1,因此在区域足迹深度占比情况相同。对关中地区各市1995—2015年足迹深度空间格局进行分析,结果如图6。关中地区5个市的足迹深度在1995年依次为西安>渭南>宝鸡>咸阳>铜川,2005年依次为西安>宝鸡>咸阳>渭南>铜川,2015年依次为西安>渭南>咸阳>宝鸡>铜川。关中地区5个市1995—2015年足迹深度均大于原长1,表明各市均处于生态赤字状态。西安市在20 a的研究期间均处于关中地区足迹深度首位,且在1995—2010年一直呈现增长趋势,由5.18增至6.61。这说明西安人口产业聚集所带来的对生态系统的压力需要5~6倍于自身的土地面积才能够满足

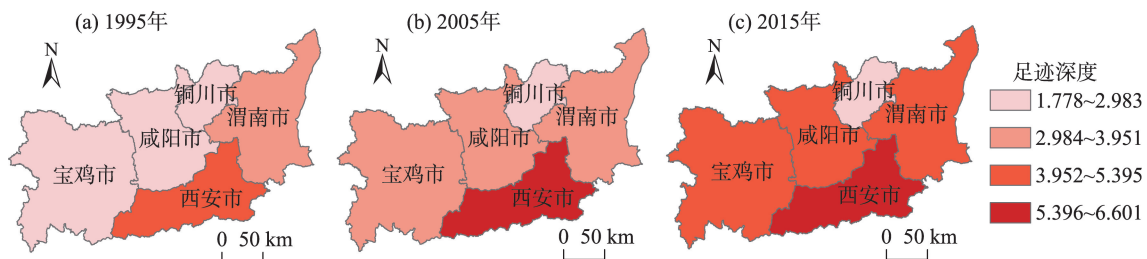


图6 关中地区足迹深度空间格局

Fig.6 Spatial patterns of land use ecological footprint depth in the Guanzhong region

当前需求,或者说为满足当前西安发展需求,再生产满足当地人口1 a的生物产品需要5~6 a。虽然西安足迹深度增长态势于2015年得到遏制,由2010年的6.61降至2015年的5.98,但仍处于较高水平。渭南、宝鸡、咸阳以及铜川市足迹深度在研究期间均呈现先增后减的变化趋势,其中铜川市虽处于较低水平(1.78~2.95),但仍大于原长1,说明铜川市虽较之关中地区其余4个市能提供较为充足的土地承载力,但仍不能满足其自身发展,仍需消耗约2~3倍的生物生产性土地面积才得以满足当前生物生产需求。

3.2 自然资本利用

3.2.1 自然资本多样性分析

得益于耕地足迹广度占比降低,其他地类占比增加,关中地区自然资本流量多样性指数表现出上升趋势(图7),由1995年的0.64增至2015年的0.81,增幅为0.17,年增长率为5.8%,但仍处于较低水平,说明关中地区流量资本占用较不均衡,但不均衡程度逐渐降低。同期,关中地区自然资本存量多样性指数表现出小幅下降趋势,由1995年的1.48降至2015年的1.27,降幅为0.21,年降低率为3.6%,但仍远高于同期自然资本流量多样性,这表明关中地区人类活动对存量资本的消耗较为均衡,但随着时间的推移,对某类存量资本(耕地、草地)过度消耗的情况逐渐突出。

3.2.2 自然资本存量流量利用比和流量资本占用率

为更清楚地反映关中地区各市自然资本利用状况,衡量各市的生态压力和自然资本利用的可持续性,通过式(7)、(8)计算存量资本—流量资本利用比和流量资本占用率,结果见表3。

可以看出,随着研究时期的推进,关中地区各市均表现出严重消耗耕地和草地存量资本来弥补

两者流量资本不足的问题,与可持续发展理念相悖。耕地存量—流量利用比低值区为铜川、咸阳、宝鸡、渭南4个市,主要原因在于其耕地足迹广度较大,自然资源禀赋条件较好,环境压力相对弱;耕地存量—流量利用比高值区位于西安,耕地存量消耗已接近流量的8倍,这与西安高人口密度、高消费需求有关;草地存量—流量利用比低值区位于宝鸡,高值区位于西安、渭南、咸阳、铜川4个市,且西安、咸阳、渭南3市草地存量消耗相继超过流量的10倍,草地生态系统承受巨大压力;相较于耕地和草地均处于生态赤字情况,关中地区各市林地和水域在20 a研究期内均表现为生态盈余。林地流量利用率均不足10%,处于较低利用水平,但各市均表现出逐渐增加的变化趋势;水域流量处于较高利用水平,其中流量利用高值区位于西安、咸阳2市,这

表3 各市各地类存量流量利用情况

Tab.3 Use of capital stock and flow in the Guanzhong region

地区	年份	UR _{no} ^{sto}		UE _{no} /%	
		耕地	草地	林地	水域
西安	1995	5.42	5.80	0.37	51.96
	2000	6.33	7.79	0.69	51.46
	2005	6.90	9.71	2.22	50.10
	2010	7.78	10.03	6.50	60.74
	2015	7.10	10.95	8.92	70.64
铜川	1995	0.64	2.22	0.91	16.26
	2000	1.54	3.13	1.67	21.77
	2005	1.63	5.52	5.55	37.53
	2010	2.00	5.97	6.85	44.33
	2015	1.85	7.06	9.87	54.01
宝鸡	1995	2.24	0.68	1.01	18.03
	2000	2.90	1.24	0.90	23.40
	2005	3.54	3.18	2.78	34.14
	2010	4.31	3.52	2.25	30.79
	2015	3.87	4.25	7.53	33.05
咸阳	1995	0.91	4.01	0.72	27.45
	2000	2.45	5.22	1.64	60.48
	2005	2.95	9.86	1.29	62.64
	2010	3.60	10.28	6.51	68.41
	2015	3.38	11.01	7.79	76.40
渭南	1995	2.25	4.14	1.82	20.14
	2000	2.57	4.08	4.35	34.23
	2005	2.91	6.38	6.14	35.39
	2010	5.79	9.98	7.27	43.40
	2015	3.95	10.39	8.55	52.39

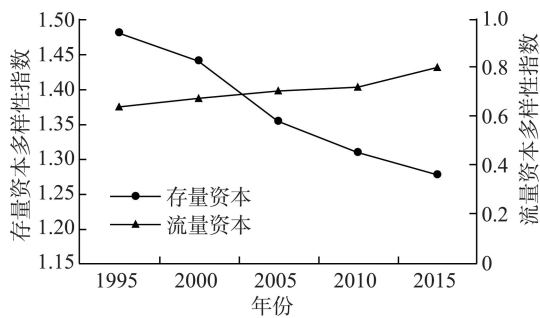


图7 自然资本多样性变化
Fig.7 Changes of natural capital diversity in the Guanzhong region

主要与2市水域承载力较低有关。低值区位于铜川、宝鸡、渭南3市。一方面原因在于铜川、宝鸡水域足迹较低,人口消费需求低;另一方面原因在于渭南拥有较高的水域承载力,因此所承受的环境压力较弱。

3.2.3 关中地区自然资本流量占用不公平程度

不公平性作为国际讨论热点话题常见于收入、教育、环境污染等方面的研究,本文将不公平性引入自然资本利用,从侧面反映出区域发展的不平衡所导致的自然资本利用状况差异。足迹广度基尼系数借鉴于经济学中常用的基尼系数的含义,目前资源环境类研究常采用梯形面积法计算基尼系数,该方法适用于参照指标在各组内等分情况。然而在计算足迹广度基尼系数时,所采用的参照指标(人口数)在各个次区域间分布存在显著差异,无法保证其在各个次区域间等量分布^[26],因此本文采用方恺等^[21]提出的矩形面积法,选取人口数和足迹广度2个参照指标,求得关中地区内部足迹广度基尼系数,结果见图8。

总体上来看,关中地区内部自然资本利用不公平性加剧,1995—2015年间,足迹广度基尼系数由0.23增至0.37,且2000—2005年增长速度最快,表明关中地区内部流量资本占用的代内不公平程度逐渐加剧。1995—2015年间,关中地区经济发展水平较低的城市与发展水平较高的城市足迹广度之比由2.16增至2.69,两者差异逐渐增大,若将人类对自然资本消耗所产生的污染物转移考虑在内^[27],不难发现经济发展水平高的城市在满足自身发展的同时会损害经济发展水平低的城市自然资本享用权^[9],从而对关中地区内部自然资本利用的公平性产生一定负面影响。

4 讨论

本文采用改进的三维足迹模型对陕西省关中地区自然资本利用状况从产品、地类和区域三重尺度进行核算,并通过一系列衍生指标从不同角度进行剖析,从而评价其土地利用效益及可持续发展状况。考虑到研究尺度为地级市一层,因此在研究中选择本地化产量因子和均衡因子,便于反映陕西省关中地区实际面临的生态压力^[17]。从产品尺度上看,关中地区在农产品和畜牧产品生产上呈现出多元化发展趋势,对此,建议继续增强产品生产多样

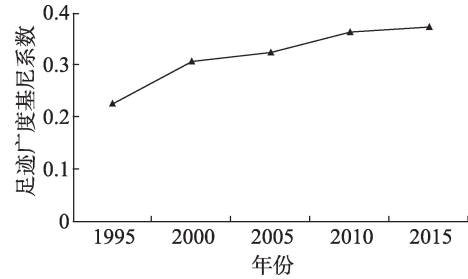


图8 足迹广度基尼系数变化

Fig.8 Change of ecological footprint size Gini coefficient

性,提高自然资本利用多样性指数;从地类尺度上看,在研究期间关中地区透支消耗耕地和草地存量资本,且对林地和水域流量资本占用显著提高,对此建议加大对耕地、草地、林地和水域等生态生产性土地的保护力度,结合乡村振兴、美丽乡村建设等战略的实施,优化农村发展模式,从而妥善处理好城市发展与生态生产性土地保护之间的关系;从区域尺度上看,关中地区人均土地足迹为0.391~0.596 $\text{hm}^2/\text{人}$,处于全国人均土地足迹平均水平(0.430~0.680 $\text{hm}^2/\text{人}$)^[28],但随着工业化及城镇化进程的加速,关中地区土地承载力逐年降低,土地生态赤字逐年增大,可持续发展状况不容乐观,建议优化发展模式,控制存量资本的消耗速度,尽量提高流量资本的利用率。

为揭示关中地区内部自然资本利用状况,本文进一步对关中5个市流量资本占用以及存量资本消耗情况进行分析,其利用状况存在着较大差别。不难发现,随着大西安、西咸一体化发展战略的推进,西安、咸阳人口吸引力快速增加,人地矛盾日渐突出,对存量资本的消耗情况日益显著,生态压力逐渐增大,发展呈现不可持续态势;宝鸡、渭南2市在研究初期生态压力较小,但随着城市发展速度加快,其存量资本消耗加剧,可持续性发展逐渐减弱;铜川市人口吸引力相对较低,自然资源禀赋条件相对较高,生态压力相对较小,具有一定发展潜力。因此,西安和咸阳2市应适当控制人口增长,优先改善生态环境,提高土地承载力,缓解生态赤字的压力,逐步增强发展的可持续性。而宝鸡和渭南2市应积极推行农业供给侧改革,保护耕地面积,提高耕作质量,实行高效率集中化生产模式,优化土地利用空间格局。铜川市应积极寻求可持续发展道路,推进产业结构转型升级,可以适当增加生态治理投入,改善当前生态赤字状况。需要指出,区域

内部各市的区位差异所带来的自然资本利用状况差异不可忽视,若能够将不同区位的自然资本流动的因素进行更深一步分析,则更有助于反映不同地区的定位差异及发展潜力。与此同时,本文对于区域内部不公平性的研究单从足迹广度基尼系数进行评判,其结果只能从总体上反映流量资本占用的差异,并不能够体现各个次区域之间流量资本占用的绝对差异^[21],导致本文对于该部分研究有些空洞,若能继续深化次区域间不公平程度的研究,选择不同衍生指标来反映自然资本利用的代际和代内公平性,则能更好地揭示区域内部可持续发展实际状况。

5 结论

(1) 关中地区 1995—2015 年土地足迹呈现先增后减的变化趋势,土地承载力呈现逐年下降的趋势,且两者差距逐渐增大,从而导致土地生态赤字逐年增大,可持续发展能力较弱。区域足迹广度在研究期间波动幅度较小,为 0.111~0.124 hm²/人,其构成组分中耕地、建设用地分别占据第一、二大组分。区域足迹深度呈现先增后减的波动变化,波动范围 3.05~5.21(最小值和最大值分别对应 1995 年和 2010 年),关中地区对自然资本存量的消耗情况仍较为严重。

(2) 关中地区 5 个市足迹深度均超过原长 1,表明消耗存量资本来弥补流量资本的不足已成关中地区社会发展的常态。西安作为关中地区核心城市,自然资本利用属于存量资本消耗高值区和流量资本占用低值区,且存量资本消耗严重超前于流量资本占用水平,可持续性发展最弱,面临的生态环境压力最大;铜川市自然资本利用属于流量资本占用高值区和存量资本消耗低值区,可持续性发展最强,生态环境压力最小;咸阳、宝鸡、渭南 3 市在研究期间存量资本消耗程度逐渐增加,尤以草地、耕地为甚,可持续性发展面临较大压力。

(3) 耕地为关中地区各市流量资本占用主要地类,占比高达 58.8%~89.7%,其次为建设用地。草地、耕地和建设用地为关中地区各市存量资本消耗主要地类,其中草地和耕地存量资本在各市均表现出严重过度消耗,生态系统压力较大,尤以西安为甚。关中地区内部在研究期内自然资本流量占用情况相对合理,但随着研究时期的推进,区域内部

流量占用不公平程度以 0.007/a 的速度逐渐加剧,若仍不采取措施控制此发展形势,2025 年将呈现较不均衡状态,2030 年则为高度不均衡。

参考文献(References)

- [1] 朱洪革, 蒋敏元. 国外自然资本研究综述 [J]. 外国经济与管理, 2006, 28(2): 1-6, 14. [Zhu Hongge, Jiang Minyuan. Review of foreign natural capital research. Foreign Economics & Management, 2006, 28(2): 1-6, 14.]
- [2] Aronson J. Natural capital: The limiting factor [J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 1-5.
- [3] Alexander H. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [J]. Pacific Conservation Biology, 1997, 6(2): 220-221.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] 靳相木, 柳乾坤. 自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 163-176. [Jin Xiangmu, Liu Qiankun. Evolution of ecological footprint models for natural resources accounting. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 163-176.]
- [6] Wackernagel M. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth [J]. Population & Environment, 1995, 1(3): 171-174.
- [7] 顾晓薇, 王青, 刘建兴, 等. 基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法 [J]. 东北大学学报, 2005, 26(4): 295-298. [Gu Xiaowei, Wang Qing, Liu Jianxing, et al. New method of urban ecological footprint calculation based on "national hectare". Journal of Northeastern University, 2005, 26(4): 295-298.]
- [8] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [9] 方恺. 1999—2008 年 G20 国家自然资本利用的空间格局变化 [J]. 资源科学, 2014, 36(4): 793-800. [Fang Kai. Changes in the spatial distribution of natural capital use among G20 countries from 1999 to 2008. Resources Science, 2014, 36(4): 793-800.]
- [10] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析: 选取 11 个国家为数据源 [J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777. [Fang Kai. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3766-3777.]
- [11] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标 [J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274. [Fang Kai. Ecologi-

- cal footprint depth and size: New indicators for a 3D model. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 267-274.]
- [12] 方恺, 李焕承. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资源利用省际格局 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 1995-2005. [Fang Kai, Li Huancheng. Provincial pattern of China's natural capital use: A modification and application of ecological footprint depth and size. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 1995-2005.]
- [13] 杜悦悦, 彭建, 高阳, 等. 基于三维生态足迹的京津冀城市群自然资源可持续利用分析 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1186-1196. [Du Yue Yue, Peng Jian, Gao Yang, et al. Sustainability evaluation of natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1186-1196.]
- [14] 张星星, 曾辉. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 771-778. [Zhang Xingxing, Zeng Hui. Dynamic of three-dimensional ecological footprint in the Pearl River Delta and its driving factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 771-778.]
- [15] 马维兢, 刘斌, 杨德伟, 等. 基于三维生态足迹模型的流域自然资源动态评估: 以福建省九龙江流域为例 [J]. 资源科学, 2017, 39(5): 871-880. [Ma Weijing, Liu Bin, Yang Dewei, et al. Dynamic evaluation of natural capital using the three-dimension ecological footprint model: The Jiulong River Basin in Southeast China. *Resources Science*, 2017, 39(5): 871-880.]
- [16] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 等. 基于三维生态足迹的中国自然资源利用时空演变及驱动力分析 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1328-1339. [Zheng Defeng, Liu Xiaoxing, Wang Yanyan, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces of natural capital utilization in China based on three-dimensional ecological footprint. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1328-1339.]
- [17] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 生态足迹的模型修正与方法改进 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603. [Zhou Tao, Wang Yunpeng, Gong Jianzhou, et al. Ecological footprint model modification and method improvement. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4592-4603.]
- [18] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 等. 中国的生态服务消费与生态债务研究 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 43-51. [Xie Gaodi, Cao Shuyan, Lu Chunxia, et al. Human's consumption of ecosystem services and ecological debt in China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 43-51.]
- [19] 方恺, 吴次芳, 董亮. 城市化进程中的土地自然资源利用动态分析 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 1-13. [Fang Kai, Wu Ci Fang, Dong Liang. The use of land natural capital in the context of urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 1-13.]
- [20] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [21] 方恺, Reinout H. 自然资源核算的生态足迹三维模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707. [Fang Kai, Reinout H. A review on three-dimensional ecological footprint model for natural capital accounting. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1700-1707.]
- [22] 杨屹, 加涛. 21世纪以来陕西生态足迹和承载力变化 [J]. 生态学报, 2015, 35(24): 7987-7997. [Yang Yi, Jia Tao. The 21st century ecological carrying capacity and footprint in Shannxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 7987-7997.]
- [23] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1550-1559. [Liu Moucheng, Li Wenhua. The calculation of China's equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1550-1559.]
- [24] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597. [Liu Moucheng, Li Wenhua, Xie Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 592-597.]
- [25] 方恺, 董德明, 沈万斌. 生态足迹理论在能源消费评价中的缺陷与改进探讨 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1013-1021. [Fang Kai, Dong Deming, Shen Wanbin. Discussion on shortcomings and improvement of ecological footprint theory in energy consumption assessment. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(6): 1013-1021.]
- [26] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 69-78. [Xu Zhongmin, Cheng Guodong, Zhang Zhiqiang. A resolution to the conception of ecological footprint. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69-78.]
- [27] Wiedmann T O, Schandl H, Lenzen M, et al. The material footprint of nations [J]. *PNAS*, 2015, 112(20): 6271-6276.
- [28] 樊胜岳, 麻亮亮. 中国大陆足迹家族的环境库兹涅茨曲线分析 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1452-1462. [Fan Shengyue, Ma Liangliang. Environmental Kuznets Curve analysis of the footprints family in Mainland China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1452-1462.]

The use of land natural capital in the Guanzhong region based on a revised three-dimensional ecological footprint model

WU Jiansheng^{1,2}, LI Kaiyang^{1,3}, ZHAO Yuhao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: As a tool of natural capital accounting, ecological footprint models have been used to quantitatively estimate a region's sustainability. Three-dimensional ecological footprint is a new approach in the field of natural capital accounting around the world. Given the modern background of the Belt and Road initiative, the construction of ecological civilization, and the development of the western regions of China, it is significant for the Guanzhong region—an important area on the Silk Road—to choose a sustainable development path in the future. Based on the revised three-dimensional ecological footprint model, this study used three scales including product, land use type, and region to quantitatively calculate the land use ecological footprint size and footprint depth of the Guanzhong region and its respective municipalities from 1995 to 2015. Moreover, Gini coefficient of footprint size and other indicators were added to more clearly analyze the occupancy of natural capital flows and the consumption of natural capital stocks in the study area. Lastly, it evaluated the sustainability of natural capital use of the Guanzhong region and its municipalities. The main conclusions of the study are as follows: 1) From 1995 to 2015, the land use ecological footprint of the Guanzhong region showed a trend of increasing first and then decreasing. The land carrying capacity decreased year by year and the ecological deficit increased year by year, which is not conducive to the sustainable development of the region. 2) The five large cities in the Guanzhong region were in the situation of ecological deficit, and their footprint depth were all more than 1. Consuming stock capital to make up for the shortage of flow capital has become a normal social development pattern in the region. 3) Cropland and construction land were the main land use types occupied by natural capital flows, while grassland, cropland, and construction land were the main land use types of natural capital stocks. 4) Inequality of natural capital flow occupation in the region was gradually increasing. If no reasonable measures are taken, it will reach a relatively unbalanced state in 2025 and a highly unbalanced state in 2030. This study focused on the "actual footprint", comprehensively revealed the land use benefits in the Guanzhong region, and provided a scientific reference for the sustainable development of the region.

Keywords: three-dimensional ecological footprint; Guanzhong region; natural capital; sustainable development